

UPAYA PENURUNAN EMISI SO₂ DARI BAHAN BAKAR BATUBARA KUALITAS RENDAH (TIPE: *SUBBITUMINOUS*) DENGAN CAMPURAN BATU KAPUR (*LIMESTONE*) PADA PROSES PEMBAKARAN

Galuh Sabhrina Nugrainy*) Sudarno **) Cahyadi***)

Email: galuhnugrainy@gmail.com

ABSTRACT

Coal is a fossil fuel which is still used as an industrial fuel in Indonesia and known as the cheapest fuel than oil and gas fuel. However, the availability of high rank coal in Indonesia highly depleted, but the low rank coal reserves in Indonesia are still abundant. When the process of coal fuel combustion in the industrial sector generates byproducts, especially exhaust gas such as SO₂ emissions. If the coal characteristic has total sulfur more than 0.44%, it can be ensured that SO₂ emissions during coal combustion emissions can exceed the quality standards. Therefore, it needs research about desulfurization technology especially mixing coal with limestone CaCO₃ when the combustion process in the stoker simulator furnace. In this research, the variations of limestone which is used are the size of limestone and Ca/S ratio for limestone's weight. Total of coal combustion testing as much as once and coal combustion by mixture of limestone as much as 9 times. The total sulfur of low rank coal from Kalimantan is 0.55%. The smaller size of limestone, the higher capturing SO₂ emission and the bigger Ca/S ratio, the greater reducing SO₂ emission. Effective results in a decrease in SO₂ emissions with a mixture of limestone occurs in the weight variation of Ca /S 2, as well as variations in size 8 mesh. Maximum efficiency of SO₂ emissions removal is 65%.

Keywords: Low Rank Coal, Total Sulfur, SO₂ Emissions, Limestone, Desulfurization, Stoker Simulator

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Batubara merupakan bahan bakar fosil dengan harga yang kompetitif dan lebih murah jika dibandingkan dengan bahan bakar minyak dan bahan bakar gas. Batubara banyak digunakan sebagai bahan bakar di berbagai macam industri, seperti industri semen, industri kertas (pulp), industri tekstil, Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), Industri metalurgi, dan lain sebagainya. Saat ini penggunaan batubara terbanyak adalah pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap, hal ini seiring dengan meningkatnya permintaan kebutuhan akan energi listrik yang terus meningkat yaitu rata-rata 7,67% per tahun (Tekmira ESDM, 2006).

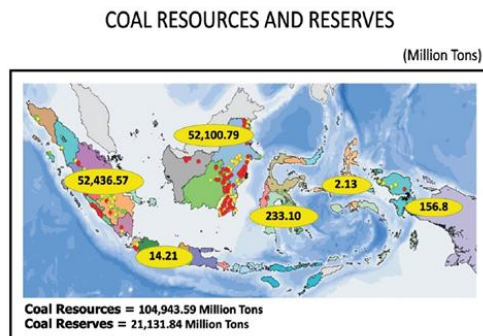
Jumlah Sumber daya batubara di Indonesia tahun 2005 berdasarkan perhitungan Pusat Sumber Daya Geologi, Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral adalah sebesar 61,366 miliar ton dan pada tahun 2011 Sumber daya batubara meningkat menjadi 104, 943 miliar ton dengan produksi batubara sebanyak 21,131 miliar ton. Sumber daya batubara tersebut tersebar di 19 Provinsi, pulau sumatera merupakan penghasil batubara terbesar di Indonesia saat ini. Namun persediaan batubara berkualitas tinggi (*High Rank Coal*) di Indonesia jumlah cadangannya sudah menipis, sedangkan batubara berkualitas rendah (*Low Rank coal*) jumlah cadangannya masih melimpah. Namun, tinggi atau rendahnya kandungan sulfur tidak tergantung dari *rank*, kelompok umur, dan geologi regionalnya, tetapi variasi kandungan sulfur kemungkinan dipengaruhi oleh lingkungan pengendapan batubara yang bersifat lebih lokal (Fatimah, dan Herudiyanto, 2011). Jenis-jenis batubara berdasarkan tingkat kualitas yang terbaik

*) Mahasiswa Program Studi Teknik Lingkungan FT UNDIP

**) Dosen Pembimbing Program Studi Teknik Lingkungan FT UNDIP

***) Pembimbing B2TE-BPPT

sampai ke yang terendah yaitu Antrasit, Bituminus, Subituminus, dan Lignit. Antrasit dan Bituminus sebagai batubara peringkat tinggi (*High Rank Coal*) masing-masing memiliki cadangan sebesar 0,3% dan 14,3 % sedangkan Subbituminus dan Lignit sebagai batubara peringkat rendah (*Low Rank Coal*) masing-masing memiliki cadangan sebesar 26,7% dan 58,7%.



Dalam proses pembakaran dengan menggunakan bahan bakar batubara di sektor industri, disamping menghasilkan suatu produk industri untuk kebutuhan masyarakat, juga menghasilkan keluaran lain berupa gas buang, yang salah satunya yaitu berupa Sulfur Dioksida (SO_2). Hanya batubara yang memiliki kandungan sulfur dibawah 0,44% yang bisa memenuhi syarat batas emisi maksimum (BME) sebesar 750 mg/Nm^3 (BPPT, 1999 Dalam Cahyadi, 2003). Proses pembakaran dengan menggunakan batubara kualitas rendah dapat menyebabkan keluaran emisi SO_2 yang tinggi dan dapat melebihi baku mutu yang ditetapkan oleh peraturan menteri lingkungan hidup. Emisi SO_2 yang tinggi ini dapat merugikan kesehatan manusia karena menyebabkan gangguan pada pernapasan dan dapat merugikan lingkungan karena menyebabkan terjadinya hujan asam.

Ada beberapa cara untuk mengurangi emisi SO_2 dalam penggunaan batubara kualitas rendah sebagai bahan bakar utama dalam proses pembakaran. Cara-cara yang telah diterapkan di industri antara lain injeksi batu kapur (*limestone*) pada *boiler stoker*, penggunaan teknologi *Flue Gas Desulphurization*, pencampuran batubara kualitas tinggi dengan kualitas rendah, dan lain-lain. Dalam penelitian ini, akan dikaji lebih lanjut dengan menggunakan metode terbaru yaitu percampuran batu kapur (*limestone*) dengan bahan bakar batubara kualitas rendah tipe *Subbituminous* pada proses pembakaran terhadap penurunan emisi SO_2 sebelum hal tersebut diterapkan pada proses pembakaran batubara dengan menggunakan alat *stoker simulator*.

1.2 Tujuan

1. Mengkaji dan menganalisis karakteristik batubara kualitas rendah tipe subbituminus sebagai bahan bakar tipe *stoker* dan batu kapur yang digunakan sebagai pencampur bahan bakar batubara tersebut sebagai upaya untuk penurunan emisi SO_2 .
2. Mengkaji dan menganalisis sejauh mana pengaruh pencampuran batukapur dengan variasi berat batu kapur (Ca/S) dan ukuran partikel tertentu dalam upaya penurunan emisi SO_2 pada proses pembakaran batubara subbituminous pada *stoker simulator*.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian Pencemaran Udara

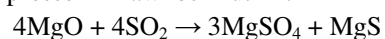
Menurut Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 41 Tahun 1999 Tentang Pengendalian Pencemaran Udara, pencemaran udara didefinisikan sebagai masuknya atau dimasukkannya zat, energi, dan/atau komponen lain ke alam udara ambien oleh kegiatan manusia, sehingga mutu udara ambien turun sampai ke tingkat tertentu yang menyebabkan udara ambien tidak dapat memenuhi fungsinya.

Emisi adalah zat, energi dan atau komponen lain yang dihasilkan dari suatu kegiatan yang masuk dan atau dimasukkannya ke dalam udara ambien yang mempunyai dan atau tidak mempunyai potensi sebagai unsur pencemar.

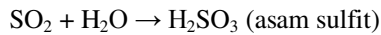
2.2 Polutan Udara Sulfur Oksida

Sulfur oksida merupakan pencemar yang paling umum, terutama yang ditimbulkan akibat pembakaran bahan bakar fosil, yang mengandung sulfur tinggi dalam bentuk sulfur organik dan inorganic. Pembakaran bahan bakar fosil akan menghasilkan kira – kira 30 bagian sulfur dioksida untuk setiap bagian sulfur trioksida. Oksida – oksida sulfur biasanya terdiri dari sulfur dioksida, sulfur trioksida, asam sulfat, asam sulfit. Sulfur dioksida merupakan bagian yang paling dominan sehingga oksida – oksida sulfur biasanya diukur sebagai sulfur dioksida (Soedomo, 2001:141).

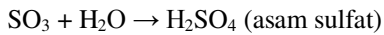
Gas SO_2 juga dapat membentuk garam sulfat apabila bertemu dengan oksida logam, yaitu melalui proses kimiawi berikut ini:



Udara yang mengandung uap air akan bereaksi dengan gas SO₂ sehingga membentuk asam sulfit:



Udara yang mengandung uap air akan bereaksi dengan gas SO₃ membentuk asam sulfat:



Pemakaian batubara sebagai bahan bakar pada beberapa kegiatan industri seperti yang terjadi di beberapa negara Eropa Barat dan Amerika, menyebabkan kadar gas SO_x dengan uap air yang terdapat di udara akan membentuk asam sulfit maupun asam sulfat. Apabila asam sulfit dan asam sulfat turun ke bumi bersama-sama dengan jatuhnya hujan, terjadilah apa yang dikenal dengan *Acid Rain* atau hujan asam. Hujan asam sangat merugikan karena dapat merusak tanaman maupun kesuburan tanah. Pada beberapa negara industri, hujan asam sudah menjadi persoalan yang sangat serius karena sifatnya yang merusak. Hutan yang gundul akibat jatuhnya hujan asam akan mengakibatkan lingkungan menjadi semakin parah. Gambar di atas menunjukkan bagaimana terjadinya hujan asam yang menyebabkan kerusakan lingkungan (Wardhana, 1995).

2.3 Batubara

Batubara adalah istilah umum yang mencakup banyaknya mineral organik padat dengan komposisi dan sifat yang sangat berbeda, meskipun semua pada dasarnya kaya amorphons (tanpa struktur biasa) karbon dasar. Ini ditemukan di endapan-endapan berlapis di tempat berbeda dan sering berada di kedalaman yang hebat. Meskipun terkadang dekat dengan permukaan. Di perkiraan di Amerika Serikat terdapat 270.000 miliar ton cadangan yang dapat diperoleh kembali (itu semua dapat ditambang secara ekonomis pada masa yang akan datang) di 36 dari 50 negara. Amerika Serikat menyumbang simpanan batubara sekitar 30 persen dari total dunia (El-Wakil, 1984:123). Berdasarkan tingkatannya, jenis-jenis batubara yaitu antrasit, bituminus, subbituminus, lignit, dan gambut.

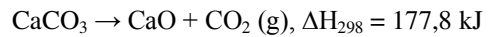
2.4 Batu Kapur

Kapur adalah batuan sedimen terutama terdiri dari kalsium karbonat (CaCO₃) dalam bentuk kalsit mineral. Batuan ini paling sering terbentuk di perairan laut yang dangkal. Ini biasanya merupakan batuan sedimen organik yang terbentuk dari akumulasi cangkang hewan, karang, alga dan puing-puing.

Batu kapur mengandung 98,9% kalsium karbonat (CaCO₃) dan 0,95% magnesium karbonat

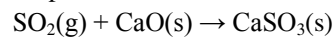
(MgCO₃) (Russell, 2007). Batu kapur di alam jarang ada yang murni, karena umumnya mineral ini selalu terdapat partikel kecil kuarsa, felspar, mineral lempung, pirit, siderit dan mineral lainnya. Dalam mineral batu kapur terdapat juga pengotor, terutama ion besi.

Saat proses kalsinasi, batu kapur (CaCO₃) akan terurai menjadi kapur bakar dengan rumus kimia CaO (kalsium oksida) dan gas karbon dioksida, CO₂ sesuai dengan reaksi berikut:

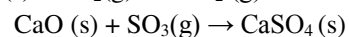
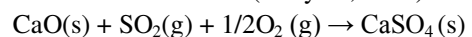


Proses kalsinasi meliputi pelepasan air, karbon dioksida atau gas-gas lain yang terikat secara kimiawi. Proses kalsinasi lebih endotermik daripada proses drying. Sehingga panas harus dipasok dari sumber dengan temperatur relatif tinggi (Rosenqvist T., 2004).

Menurut Prof. Shakhshiri dalam www.scifun.org, pengendalian polusi dapat memperluas konsumen kapur dengan pesat. Kapur digunakan di cerobong pada *scrubber* untuk mengurangi emisi SO₂ dari pembangkit listrik. Sulfur dioksida bereaksi dengan kapur membentuk kalsium sulfit padat.



Jika kapur digunakan dalam proses LIFAC (*Limestone Injection into the Furnace and Activation of Calcium Oxide*) didalam tungku bagian sulfur dioksida dan sulfur trioksida dalam gas buang akan bereaksi dengan kalsium oksida, membentuk kalsium sulfat (Cahyadi, 2006)



III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tipe Penelitian

Dalam penelitian ini merupakan penelitian metode eksperimental yang diawali dengan tahap persiapan, tahap pelaksanaan, dan tahap penyusunan laporan. Tahap persiapan meliputi penelitian pendahuluan di laboratorium, tahap pelaksanaan yang meliputi uji lapangan, dan yang terakhir adalah tahapan penyusunan laporan yang meliputi analisa dan pembahasan dari hasil uji.

3.2 Metode Pengambilan Data

Dalam pengambilan data laporan tugas akhir ini, diperlukan suatu data dan informasi yang mendukung serta mempunyai nilai kebenaran yang tinggi. Tahap pengambilan data meliputi pengambilan data analisa ultimat dan proksimat pada batubara, data analisa TGA pada batubara dan

batu kapur, data perhitungan perbandingan berat batu kapur (Ca/S), data kebutuhan udara pembakaran, dan data emisi khususnya SO₂ pada batubara sebelum dan sesudah dicampurkan dengan batu kapur. Data yang diperlukan adalah data penunjang dan data pendukung untuk penelitian. Pengambilan data dapat dilakukan dengan berbagai cara, yaitu dengan wawancara, melakukan survey dan observasi/pengamatan langsung di lapangan, mengumpulkan data dari dokumen di instansi terkait, dan mengambil foto dokumentasi menggunakan kamera.

3.3 Alat, Bahan, dan Variabel Penelitian

Berikut adalah alat dan bahan pengujian yang digunakan:

- Batubara kualitas rendah tipe subbituminous asal Kalimantan
- Batu Kapur (limestone) CaCO₃ asal Cipatat, Jawa Barat
- *Stoker Simulator* sebagai alat uji bakar batubara utama, dengan cerobong dan blower sebagai pelengkap.
- Untuk alat uji karakterisasi bahan di laboratorium, menggunakan alat *Thermogravimetry analyzer (TGA)*, *Ultimate and Proximate Analyzer*, dan *Bomb Calorimeter*.
- Alat pendukung saat pengujian pembakaran batubara: termokopel tipe K, *gas analyzer*, *data logger*, *flow meter*.
- Alat bantu: pengayak ukuran mesh untuk batu kapur, pengayak ukuran cm untuk batubara, *crusher*, dan timbangan.

Variabel-variabel yang ditentukan dalam penelitian ini yaitu:

- Variabel bebas: berat batu kapur dengan rasio Ca/S 1, 2, 3, dan ukuran partikel batu kapur dengan variasi 4, 8, dan 16 mesh.
- Variabel terikat: hasil analisa ultimat, proksimat, dan analisa kalor batubara, hasil analisa TGA pada batubara dan batu kapur, serta temperatur pembakaran.
- Variabel kontrol: udara pembakaran
- Variabel tetap: asal sampel batubara dan batu kapur CaCO₃, ukuran partikel batubara tetap, alat utama *stoker simulator* serta alat pendukungnya.

3.4 Prosedur Operasional Penelitian

Pengujian emisi gas buang yang dikeluarkan dari proses pembakaran batubara dilakukan dengan menggunakan alat ukur gas analyzer bacharach ECA 450 dengan satuan ppm dan alat ukur temperature yaitu termokopel tipe K yang telah terkoneksi dengan *data logger* merk omron. Termokopel tipe K dipasang ke lubang-lubang pengukuran (*probe*) yang sudah ada pada dinding ruang bakar *stoker simulator* dengan penamaan penempatan T1, T2, dan T3. Data hasil emisi dan data temperatur dicatat secara otomatis (online) per 15 detik. Pada awal memulai pembakaran batubara, harus ditambahkan serbuk gergaji di atas batubara yang telah dimasukkan ke dalam *stoker simulator*. Setelah serbuk gergaji di tabur secara merata, api mulai dinyalakan di tumpukan sebuk gergaji. Agar api bisa membesar, terbakar secara merata dan konstan, compressor dinyalakan dengan laju aliran udara yang sudah ditentukan. Setelah batubara sampel pada bagian atas telah menyala dengan merata, cerobong dirapatkan dengan tungku pembakaran *stoker simulator*. Persiapan awal pun telah selesai dan siap untuk mengambil data-data pengujian yaitu emisi, temperatur ruang bakar dan aliran udara bakar dengan cara merekam hasil pengujian tersebut dengan menggunakan data logger dan gas analyzer. Setelah melakukan pengujian pembakaran batubara dengan campuran batu kapur, data yang telah terekam dipindahkan ke komputer dan disimpan dalam bentuk *softcopy*. Sedangkan data-data temperature pada tungku pembakaran diukur secara langsung dengan termokopel dan dicatat secara otomatis oleh data logger, setelah data terekam kemudian di simpan di *flash disk* dalam bentuk *softcopy*. Untuk data kebutuhan udara dan temperatur di dalam cerobong diukur dan dicatat langsung secara manual.



Gambaran Proses Penelitian/Pengujian Lapangan



Gambaran Pembakaran dengan tungku *Stoker Simulator*

Setelah melakukan pengujian secara langsung, data emisi dan data temperatur yang telah didapat secara online, kemudian dilakukan pengolahan data dengan menggunakan microsoft excel, sedangkan untuk olah data statistik serta stabilisasi data menggunakan software minitab, dan pembuatan grafik dengan menggunakan software Origin Pro. Data hasil pengujian emisi SO_2 yang diinput oleh gas analyzer di atur dalam satuan ppm, untuk itu perlu adanya konversi menjadi satuan mg/m^3 sesuai dengan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup no. 21 Tahun 2008 Tentang Baku Mutu Emisi Sumber Tidak Bergerak Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Pembangkit Listrik Termal. Rumus konversi satuan adalah sebagai berikut:

$$C (\text{mg/m}^3) = C (\text{ppm}) \times \frac{BM}{22400} \times \frac{273}{273 + t} \times \frac{P}{760}$$

(saar kondisi 25°C , tekanan 1 atmosfer sama dengan 760mmHg)

atau

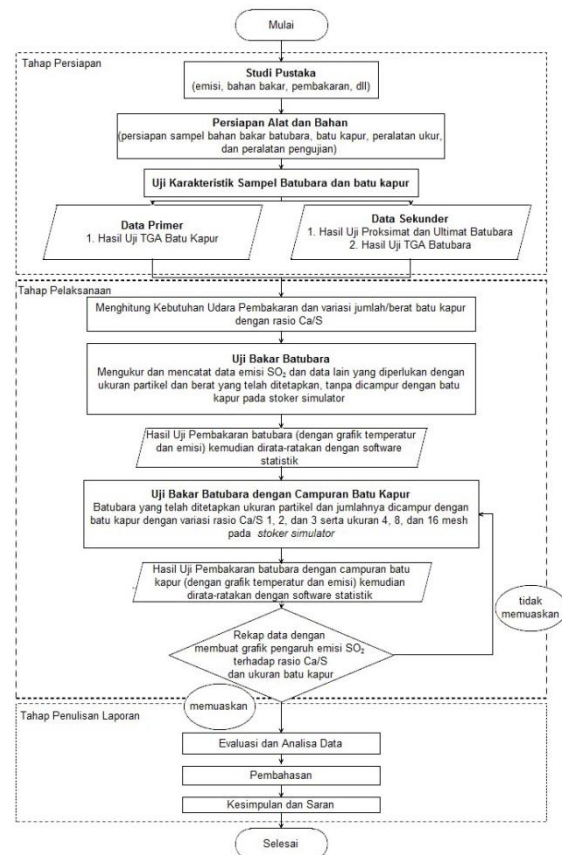
$$C (\text{mg/m}^3) = \frac{(\text{konsentrasi dalam ppm}) \times (\text{berat molekul})}{24,45}$$

Satuan antara mg/m^3 dengan mg/Nm^3 sebenarnya memiliki prinsip yang sama, hanya saja untuk satuan mg/Nm^3 dimaksudkan volume emisi gas buang yang dikeluarkan dalam keadaan Normal (tekanan 1 atm dan keadaan suhu atmosfer 25°C). Jadi, konversi satuan dari ppm ke mg/m^3 disamakan seperti satuan dari ppm ke mg/Nm^3 dengan rumus yang disesuaikan.

Setelah mendapat hasil emisi SO_2 dengan konversi satuan mg/m^3 , diperlukan perhitungan dengan menggunakan rumus emisi terkoreksi dengan faktor koreksi oksigen sebesar 7% untuk bahan bakar batubara. Penetapan koreksi oksigen sesuai dengan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup no. 21 Tahun 2008 Tentang Baku Mutu Emisi Sumber Tidak Bergerak Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Pembangkit Listrik Termal lampiran 1A. Rumus emisi terkoreksi untuk parameter SO_2 adalah sebagai berikut:

$$C \text{ terkoreksi} = C \text{ terukur} \times \frac{(21 - \text{O}_2 \text{ koreksi})}{(21 - \text{O}_2 \text{ terukur})}$$

3.5 Diagram Alir Penelitian



IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Klasifikasi Batubara

Hasil analisa ultimat dan proksimat batubara asal kalimantan memiliki komposisi sebagai berikut:

Moisture	: 11,48%
Ash	: 5,96%
Volatile Matter	: 46,00 %
Fixed Carbon	: 36,56 %
Carbon	: 57,08%
Hydrogen	: 4,24%
Nitrogen	: 0,51%
Sulfur	: 0,55%
Oxygen	: 20,18%

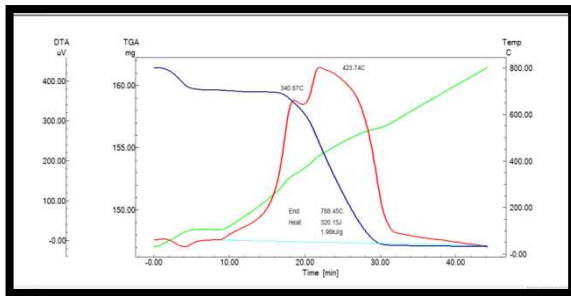
Dari hasil analisa ultimat pada sampel batubara tersebut total sulfur pada *Air Dried Basis* (ADB) mencapai 0,55%. Dari hasil riset yang sudah dilakukan bahwa batubara dengan kandungan sulfur lebih besar dari 0,44% apabila dibakar dengan skala besar akan menghasilkan emisi SO_2 di atas ambang batas baku mutu yang disyaratkan. Dengan demikian dapat ditarik kesimpulan bahwa kandungan sulfur sampel batubara asal kalimantan tersebut apabila dibakar

akan melebihi ambang batas baku mutu emisi sumber tidak bergerak di setiap industri.

Hasil analisa kalor asal Kalimantan menghasilkan kalor sebesar 5468 kcal/kg yang dikonversikan menjadi 22.836,272 kJ/kg. Dari hasil konversi tersebut, batubara ini merupakan batubara *low rank coal* dengan tipe *subbituminous* yang memiliki nilai kalor antara 19300 s/d 26750 kJ/kg.

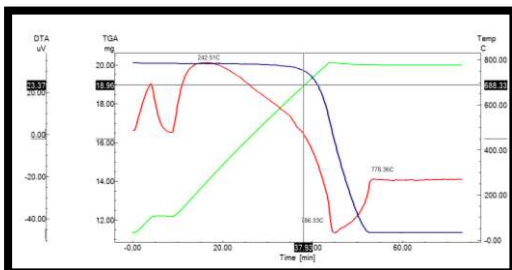
4.2 Hasil Analisa TGA

1. Hasil Analisa TGA Batubara

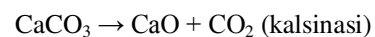


Dari hasil TGA pada grafik warna biru, penurunan massa pada batubara Kalimantan terjadi pada suhu awal di bawah 200 °C dan terjadi penurunan secara signifikan pada suhu 340,87 °C hingga dibawah 800 °C. Jika dilihat dari Grafik DTA berwarna merah, proses awal pada pembakaran batubara sedang mengalami proses menguapnya kandungan uap air sehingga pembakaran masih belum sempurna. Pada saat temperatur 340°C terjadilah reaksi eksotermik yang mengalami kenaikan grafik secara signifikan, reaksi ini terjadi karena batubara sedang mengalami proses pembakaran volatile matter. Pada temperature 423 °C hingga di atas 600 °C grafik menunjukkan bahwa pembakaran batubara mengalami proses reaksi endotermis dimana sedang mengalami proses pembakaran char (arang) dan sampai temperatur tertinggi 800 °C batubara yang telah menjadi char mengalami proses residual abu.

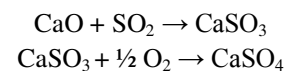
2. Hasil Analisa TGA Batu Kapur



Jika dilihat dari grafik TGA berwarna biru, penurunan atau dekomposisi massa pada *limestone* CaCO_3 secara signifikan terjadi pada suhu 688,33°C sampai dengan suhu 800°C. Efisiensi penurunan massa dari berat 20,190mg menjadi 11,324mg mencapai 43,91%. Berat akhir tersebut telah mengalami proses kalsinasi menjadi CaO . Sedangkan dari hasil grafik DTA berwarna merah, reaksi endotermis terjadi pada temperature 242,51°C sampai dengan 800°C. Artinya, *limestone* CaCO_3 mengalami proses kalsinasi menjadi CaO dengan reaksi sebagai berikut:



Pada proses penahanan suhu 800°C selama 30 menit, *lime* CaO mengalami reaksi eksotermis, artinya *lime* CaO telah siap untuk mengikat SO_2 pada saat proses pembakaran batubara dengan reaksi sebagai berikut:



Jika hasil penurunan massa pada grafik TGA Batubara dibandingkan dengan grafik TGA batu kapur 800°C, penurunan massa pada batubara mengalami penurunan lebih cepat daripada penurunan massa pada batu kapur. Hasil penurunan massa pada TGA batubara secara signifikan terjadi pada suhu 340 s/d 550°C di menit 20 s/d 30, sedangkan TGA batu kapur terjadi pada suhu 700 s/d 778°C di menit ke 40 s/d 50. Pada TGA batubara, suhu 340°C terjadi pembakaran volatile di menit ke 20 dimana gas SO_2 mulai keluar, namun pada TGA batu kapur suhu 786°C batu kapur telah terkalsinasi menjadi CaO di menit ke >40 dimana CaO siap mengikat SO_2 . Hasil analisa perbandingan TGA batubara dengan batu kapur ini merupakan hasil identifikasi awal. Oleh karena itu, saat penelitian lapangan melalui uji pembakaran dengan *stoker simulator*, perlu diperhatikan peletakan batu kapur di antara batubara hingga tercapainya hasil terbaik dengan ukuran batu kapur.

4.3 Perhitungan Variasi Perbandingan Berat Sampel Batu Kapur (Rasio Ca/S)

Pada umumnya, komposisi batu kapur CaCO_3 di Indonesia sebesar 95%

hingga 99% yang didampingi dengan kandungan sulfur, kandungan air, CO₂, dan unsur-unsur logam. Komposisi dalam 1 gram batu kapur CaCO₃ (dengan asumsi kandungan 99%) yang telah terkalsinasi dengan efisiensi penurunan 44% (dari hasil TGA pada tabel 4.8) mengandung 45% CaO. Variasi ukuran batu kapur yang digunakan untuk proses pembakaran lebih kasar jika dibandingkan dengan ukuran batu kapur yang digunakan, Semakin kasar ukuran batu kapur (≤ 60 mesh), maka temperatur yg dibutuhkan untuk proses kalsinasi menjadi semakin tinggi ($>800^{\circ}\text{C}$). Total sulfur sampel batubara *subbituminous* asal Kalimantan adalah 0,55% (dari tabel analisa proksimat dan ultimat), Berat rata-rata batubara untuk dimasukkan ke dalam *stoker* = $\pm 543,8$ gr (sesuai volume ruang bakar *stoker simulator*). Jadi, diperoleh berat sulfur : $543,8 \text{ gr} \times 0,55\% = 2,99$ gram sulfur

➤ **Ca/S**

• **Untuk Ca/S = 1**

$$2,99 \times 1 = 2,99 \text{ gram}$$

$$1 \text{ gr CaCO}_3 = 0,45 \text{ gr CaO}$$

Berat batu kapur dengan rasio

$$\text{Ca/S (1)} = (1/0,45) \times 2,99 \text{ gr} = 6,64 \text{ gr}$$

Di buat 3 sampel dengan variasi ukuran : 4,8, dan 16 mesh

• **Untuk Ca/S = 2**

$$2,99 \times 2 = 5,98 \text{ gram}$$

$$1 \text{ gr CaCO}_3 = 0,45 \text{ gr CaO}$$

Berat batu kapur dengan rasio

$$\text{Ca/S (2)} = (1/0,45) \times 5,98 \text{ gr} = 13,29 \text{ gr}$$

Di buat 3 sampel dengan variasi ukuran : 4,8, dan 16 mesh

• **Untuk Ca/S = 3**

$$2,99 \times 3 = 8,97 \text{ gram}$$

$$1 \text{ gr CaCO}_3 = 0,45 \text{ gr CaO}$$

Berat batu kapur dengan rasio

$$\text{Ca/S (1)} = (1/0,45) \times 8,97 \text{ gr} = 19,93 \text{ gr}$$

Di buat 3 sampel dengan variasi ukuran : 4,8, dan 16 mesh

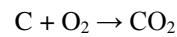
4.4 Kebutuhan Udara Pembakaran

a.) **Kebutuhan Udara Teoritis**

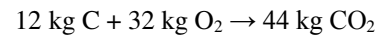
Kebutuhan udara pembakaran untuk membakar tiap 1 kg batubara yang terdiri dari C kg karbon, H kg hidrogen, O kg

oksigen. Hasil prosentase (%) dari C, H, dan O berasal dari analisa ultimat batubara asal Kalimantan. Jadi, perhitungan secara teoritis adalah:

- Untuk membakar karbon (C):



(2-1)



Kebutuhan O₂ untuk membakar 1 kg

$$\text{C} = \frac{32}{12} \text{ kg O}_2$$

O₂ untuk membakar C dalam bahan

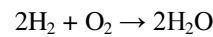
$$\text{bakar} = \frac{32 \text{ C}}{12} \text{ kg O}_2$$

Tiap kg udara mengandung 0,231 kg

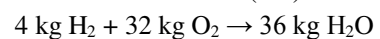
O₂, maka kebutuhan udara bakar untuk membakar C kg karbon adalah:

$$\frac{32 \text{ C}}{(12 \times 0,231)} \text{ kg udara}$$

- Untuk membakar hidrogen (H):



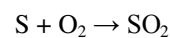
(2-2)



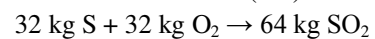
Dengan cara yang sama untuk membakar H kg hidrogen diperlukan:

$$\frac{32 \text{ H}}{(4 \times 0,231)} \text{ kg udara}$$

- Untuk membakar belerang (S):



(2-3)



Dengan cara yang sama untuk membakar S kg belerang dibutuhkan:

$$\frac{32 \text{ S}}{(32 \times 0,231)} \text{ kg udara.}$$

Jadi, jumlah berat udara yang dibutuhkan (G^u) untuk membakar 1 kg bahan bakar secara teoritis (Sudjito, 1992 dalam Sutrisno, 1994:33):

$$G^u = \frac{32 \text{ C}}{(12 \times 0,231)} + \frac{32 \text{ H}}{(4 \times 0,231)} + \frac{32 \text{ S}}{(32 \times 0,231)} = \frac{O}{0,231} \text{ kg (kg bb)}^{-1}$$

(2-4)

Atau :

$$G^u = 11,53 \text{ C} + 34,56 \left[\text{H} - \frac{O}{8} \right] + 4,32 \text{ S} \text{ kg (kg bb)}^{-1} \quad (2-5)$$

Dalam keadaan standar, 1 atm dan 0°C, berat jenis udara = 1,239 kg m⁻³, maka volume udara teoritis (V^u) yang dibutuhkan:

$$V^u = \frac{G^u}{1,239} \text{ m}^3 \text{ (kg bb)}^{-1}$$

(2-6)

Hasil perhitungan kebutuhan udara adalah sebagai berikut:

$$G_t^u = 11,53 C + 34,56 \left[H - \frac{O}{8} \right] + 4,32$$

$$S \text{ kg (kg bb)}^{-1}$$

$$G_t^u = 11,53 (0,5708) + 34,56 (0,0424 - \frac{0,2018}{8}) + 4,32 (0,0055) \text{ kg (kg bb)}^{-1}$$

$$G_t^u = 7,19848 \text{ kg (kg bb)}^{-1}$$

Pada temperatur 30°C, berat jenis udara = 1,167 kg m⁻³, maka volume udara teoritis (V_t^u) yang dibutuhkan adalah:

$$V_t^u = \frac{G_t^u}{1,167} \text{ m}^3 \text{ (kg bb)}^{-1}$$

$$V_t^u = \frac{7,19848}{1,167} \text{ m}^3 \text{ (kg bb)}^{-1}$$

$$V_t^u = 6,16836 \text{ m}^3 \text{ (kg bb)}^{-1}$$

Jadi, untuk membakar batubara sebanyak 0,5 kg/jam (d disesuaikan dengan ukuran tungku *Stoker*) membutuhkan volume udara minimum:

$$V_t^u = 6,16836 \text{ m}^3 \text{ (kg bb)}^{-1} \times$$

$$0,5 \text{ kg/jam} = 3,08418 \text{ m}^3/\text{jam} \text{ atau } 51 \text{ liter/menit (untuk 1 kg membutuhkan volume udara 102 liter/menit).}$$

b.) Kebutuhan Udara Lebih (*Excess Air*)

Untuk membakar batubara secara sempurna diperlukan udara lebih (*excess air*). Dalam penelitian ini, kebutuhan udara lebih pada pembakaran batubara ditentukan 70%, jadi kebutuhan udara sesungguhnya adalah sebagai berikut:

$$V_{ts}^u = 3,08418 \text{ m}^3/\text{jam} \times (100\% + 70\%)$$

$$\text{m}^3/\text{jam}$$

$$V_{ts}^u = 5,2431 \text{ m}^3/\text{jam}$$

$$V_{ts}^u = 87,3851 \text{ liter/menit}$$

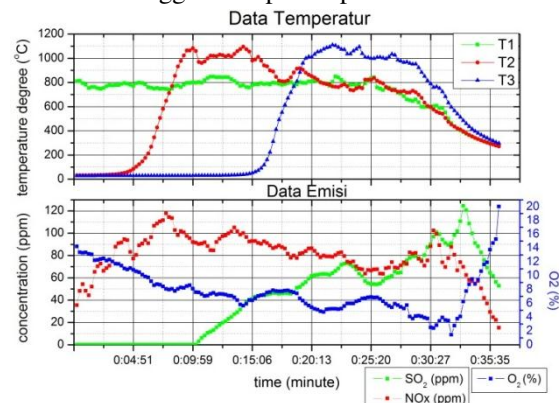
Jadi, kebutuhan udara sesungguhnya yaitu minimal 87,4 liter/menit untuk suplai udara pembakaran melalui alat penyuplai udara yaitu *compressor* atau *blower*. Kebutuhan udara berlebih pada saat proses pengujian pembakaran bervariasi, antara 65% hingga 75% udara berlebih (dapat dilihat pada lampiran). Alasan dibutuhkan udara berlebih yang cukup besar yaitu ukuran partikel batubara yang besar (ukuran 2cm) dan tingginya kandungan air pada batubara serta batu kapur.

4.3 Hasil Uji Emisi

1. Pembakaran Batubara

Berikut adalah hasil uji emisi pada pembakaran sampel batubara tipe *subbituminous* dengan menggunakan alat uji

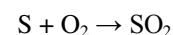
bakar *stoker simulator*. Hasil tersebut berupa tabel per 15 detik yang menghasilkan dua grafik yaitu grafik temperatur dan emisi dari awal hingga akhir proses pembakaran.



Hasil Uji Emisi pada Pembakaran

Batubara menggunakan *Stoker Simulator*

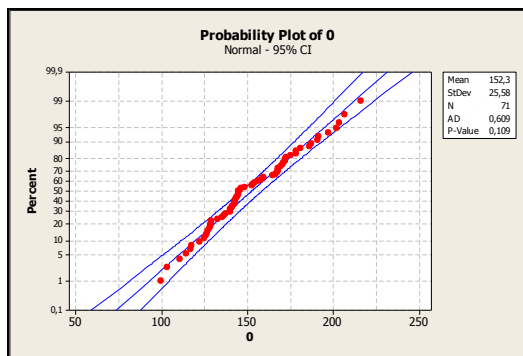
Hasil yang harus difokuskan adalah hasil emisi gas buang SO₂ yang keluar dari cerobong *stoker simulator*. Pada gambar 4.9 grafik kedua terlihat bahwa munculnya konsentrasi SO₂ terjadi di area pengukuran termokopel T2 dan T3 yang terlihat pada grafik pertama. Munculnya konsentrasi SO₂ pada proses pembakaran terjadi saat gas buang oksigen atau O₂ konsentrasinya kurang dari 10% dan temperatur pembakaran di atas 650 °C (seperti terlihat pada grafik di atas : dalam fase pembakaran selama 30 menit). Di saat inilah terjadinya proses pembakaran secara sempurna dan oksigen mulai mengikat dengan sulfur sehingga menghasilkan emisi gas buang SO₂. Berikut adalah reaksi pembakaran untuk bahan bakar padat:



Oleh karena itu untuk melihat pengaruh campuran batukapur terhadap penurunan emisi SO₂ pada pembakaran, penempatan campuran batu kapur diletakkan hanya pada 1 (satu) posisi yaitu pada posisi termokopel T2 pada ruang bakar dengan variasi ukuran batu kapur Ca/S = 1,2, dan 3 serta variasi ukuran 4, 8, dan 16 mesh. dengan metode layer (berbentuk lapisan atau ditaburkan di permukaan sampel batubara).

Hasil data emisi yang telah didapat dari alat ukur secara online, kemudian di olah dengan mengkonversikan satuan emisi ppm menjadi mg/m³. Namun, ada dua hasil akhir yang akan diperoleh dalam pengolahan data,

yaitu emisi terukur dan emisi terkoreksi. Setelah itu dilakukan olah data statistik dengan menggunakan software minitab dengan tujuan untuk memperoleh data yang telah distabilisasi dengan grafik probability plot. Hasil yang tertera pada gambar 4.10 menunjukkan rata-rata emisi terukur dari posisi T1 sampai dengan T3 sebesar 157,5 mg/m³. Namun, hasil yang sebenarnya hanya difokuskan pada posisi sekitar T3, karena pada saat di campur dengan batu kapur CaCO₃ yang telah terkalsinasi menjadi kapur CaO di posisi T2. Jadi, kapur CaO akan mengikat SO₂ yang dikeluarkan pada pembakaran batubara menjadi CaSO₄ (gypsum) saat pembakaran terjadi di sekitar posisi T3. Rata-rata emisi terkoreksi SO₂ yang tertera pada gambar 4.11 yaitu 152,3 mg/m³.

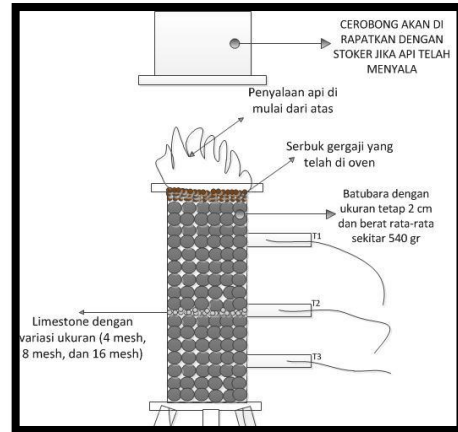


Gambar
Hasil Stabilisasi Data Emisi Terkoreksi
Pembakaran Batubara pada T3

2. Pembakaran Batubara dengan Campuran Batu Kapur

Proses pengujian pembakaran batubara dengan campuran batu kapur dilakukan setelah mengetahui hasil dari pembakaran batubara. Telah terbukti bahwa munculnya konsentrasi emisi SO₂ pada batubara mulai terdeteksi di termokopel posisi T2 yaitu saat temperatur pembakaran di atas 650°C. Oleh karena itu, sampel batu kapur diletakkan tepat di posisi T2 dengan metode layer. Pengujian dengan campuran *limestone* dilakukan sebanyak 9 kali pengujian dengan variasi Ca/S = 1,2, dan 3 dengan ukuran 4, 8, dan 16 mesh. Perhitungan berat dari rasio Ca/S berasal dari hasil analisa ultimat dan proksimat serta hasil analisa TGA batu kapur. Untuk komposisi batu kapur CaCO₃ sebesar 95% yang telah terkalsinasi menjadi CaO sebesar 45%

menghasilkan variasi berat Ca/S 1 sama dengan 6,64 gram, Ca/S 2 sebesar 13,29 gram, dan Ca/S 3 sebesar 19,93 gram. Jadi, total sampel batu kapur adalah sebanyak 9 sampel. Pada gambar di bawah ini menunjukkan pencampuran batu kapur di dalam *stoker simulator* dengan menggunakan metode layer.



Gambar
Pembakaran Batubara dengan Campuran
Limestone

Berikut adalah tabel hasil pengujian pembakaran batubara dengan alat uji *stoker simulator* yang sudah melalui proses pengolahan data:

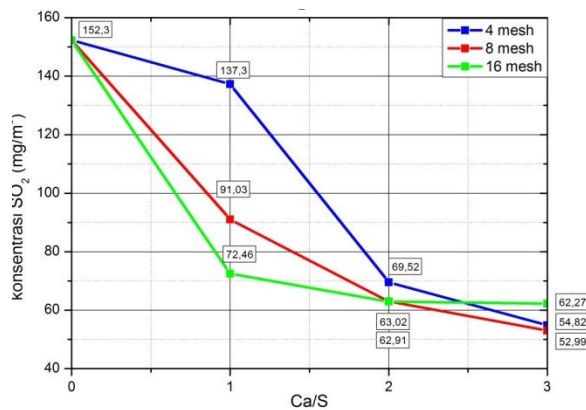
Rata-rata emisi SO ₂ batubara (mg/m ³)	Hasil Rata-rata emisi SO ₂ dalam variasi Ca/S (mg/m ³)			
	Ukuran (mesh)	1	2	3
152,3	4	137,3	69,52	54,82
152,3	8	91,03	63,02	52,99
152,3	16	72,46	62,91	62,27

Setelah membuat rekap data dalam bentuk tabel, berikut adalah hasil akhir pengolahan data berupa dua grafik, yaitu grafik konsentrasi SO₂ terhadap variasi Ca/S dan konsentrasi SO₂ terhadap ukuran (mesh) dengan menggunakan software OriginPro.

Berdasarkan hasil proses pembakaran batubara dari awal hingga akhir dengan total pengujian sebanyak 10 kali, berikut adalah temperatur maksimum yang dihasilkan

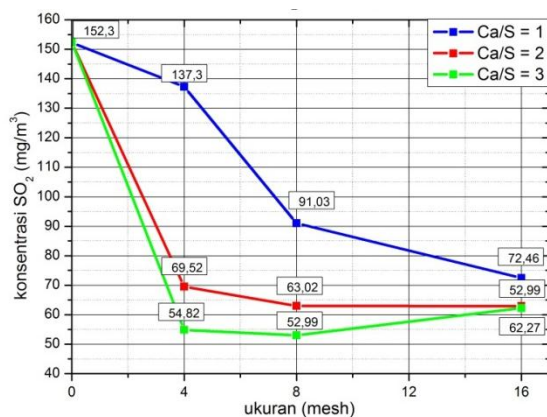
Ukuran	Ca/S	T1	T2	T3
Tanpa limestone	0	849,3	1094,9	1109,1
4 mesh	1	877,8	1170,4	1218,7
	2	870	1169,1	1229
	3	852,2	1162,2	1216,4
8 mesh	1	1103,2	1181,5	1190,9
	2	927,3	1130,9	1226,8
	3	895,3	1083,8	1219,9
16 mesh	1	876	1182,6	1147
	2	860	1177,1	1187
	3	861,4	1136,6	1135,3

4.6.1 Pengaruh Penurunan Konsentrasi SO₂ Terhadap Ca/S



Grafik di atas terlihat bahwa semakin besar variasi berat sampel dalam rasio Ca/S, maka semakin berkurangnya emisi SO_2 yang dihasilkan. Hal ini disebabkan karena penurunan emisi SO_2 yang dihasilkan dari cerobong dipengaruhi oleh variasi perbandingan berat batu kapur dalam rasio Ca/S yang dicampur pada tungku yang terisi batubara. Penurunan emisi SO_2 menunjukkan titik jenuh pada posisi Ca/S = 2, sehingga jumlah batu kapur yang terlalu banyak dapat menyebabkan penurunan emisi SO_2 sudah kurang signifikan. Efisiensi penurunan SO_2 karena pengaruh variasi berat pada perbandingan rasio Ca/S antara 9%-65%.

4.6.2 Pengaruh Penurunan Konsentrasi SO_2 terhadap Ca/S



Grafik di atas terlihat bahwa semakin halus ukuran batu kapur yang digunakan, maka semakin berkurangnya emisi SO_2 yang dihasilkan. Hal ini disebabkan karena penurunan emisi SO_2 yang dikeluarkan melalui cerobong dipengaruhi oleh ukuran batu kapur yang dicampurkan pada tungku berisi batubara. Penurunan emisi SO_2 terjadi secara linier pada rasio Ca/S = 1 dengan ukuran 4, 8, dan 16 mesh. Namun, penurunan

SO_2 terjadi secara signifikan pada rasio Ca/S = 2 dan 3 pada ukuran 4, 8, dan 16 mesh dengan mempertimbangkan ukuran yang tidak terlalu halus untuk dimasukkan ke sistem pembakaran *stoker*. Ukuran batu kapur yang terlalu kecil tidak akan bisa menahan posisinya hingga pada akhirnya jatuh pada permukaan tungku. Efisiensi penurunan SO_2 terhadap ukuran batu kapur berkisar antara 9%-65%.

Hasil terbaik pada kedua grafik pembakaran batubara dengan campuran batu kapur menunjukkan penurunan atau penangkapan emisi SO_2 lebih efektif pada rasio Ca/S = 2 dengan ukuran batu kapur 8 mesh.

V. KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian mengenai Upaya Penurunan Emisi SO_2 dari Bahan Bakar Batubara Kualitas Rendah (*low rank coal*) dengan Campuran Batu Kapur (*Limestone*) dalam proses pembakaran dengan alat uji bakar *Stoker Simulator* adalah sebagai berikut:

1. Batubara *Subbituminous* asal Kalimantan mengandung total sulfur sebesar 0,55%, dan dari hasil analisa TGA batu kapur, batu kapur mengandung CaO 45%. Hasil tersebut dapat diketahui berat/jumlah batu kapur berdasarkan rasio Ca/S = 1, 2, dan 3 yaitu sebesar 6,64 gram, 13,29 gram, dan 19,93 gram. Berdasarkan hasil karakteristik batubara dapat diketahui kebutuhan udara pembakaran secara teoritis sebesar 51 liter/menit dengan *excess air* antara 65 hingga 75%.
2. Berdasarkan hasil pengaruh konsentrasi SO_2 terhadap rasio Ca/S = 1, 2, dan 3 menunjukkan bahwa semakin tinggi rasio Ca/S, semakin tinggi penangkapan gas SO_2 , maka semakin besar pula penurunan emisi SO_2 . Berdasarkan penelitian dengan variasi ukuran batu kapur 4, 8, dan 16 mesh menunjukkan bahwa semakin halus ukuran batu kapur, maka semakin tinggi penangkapan gas SO_2 . Pada pengaruh konsentrasi SO_2 terhadap ukuran, penurunan emisi SO_2 terjadi secara linier pada rasio Ca/S = 1 dengan ukuran 4, 8, dan 16 mesh. Namun, penurunan SO_2 terjadi secara signifikan pada rasio Ca/S = 2 dan 3 dengan ukuran 4, 8, dan 16 mesh. Hasil yang terbaik menunjukkan campuran

batubara dengan batu kapur lebih efektif pada rasio Ca/S = 2 dengan ukuran batu kapur 8 mesh, dengan mempertimbangkan ukuran yang tidak terlalu halus untuk dimasukkan ke sistem pembakaran *stoker*.

5.2. Saran

Saran yang dapat diambil dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Sebaiknya dilakukan pembakaran batubara dengan campuran batu kapur dengan ukuran batu kapur kurang dari 4 mesh (ukuran lebih kasar) agar terlihat hasil yang lebih linier.
2. Perlunya perawatan dan pemeriksaan gas analyzer secara berkala, karena *moisture* yang masuk dalam selang gas analyzer saat proses pembakaran batubara dapat menghambat pengukuran emisi gas buang. Bisa juga dengan ditambahkan alat pendukung untuk menangkap *moisture* (menggunakan *water trap*).

DAFTAR PUSTAKA

- Amethyst. 1995-2012. Limestone.
<http://www.galleries.com/rocks/limestone.htm>. Juni 2014.
- Andrean. 2012. *Analisis Sampel Batubara dari Sumatera Selatan*. Institut Pertanian Bogor.
- Anggoro, M. Toha. 2007. *Metode Penelitian*. Universitas Terbuka : Jakarta.
- Anonim. Tanpa Tahun. *Optimal Combustion Processes-Fuels and Excess Air*.
http://www.engineeringtoolbox.com/fuels-combustion-efficiency-d_167.html. Desember 2014.
- Anonim. 2007. *Coal Conversion Facts: Basis of Analysis*. World Coal Institute.
www.worldcoal.org.
- Anonim. 2012. *Pemantauan Kualitas Udara dan Teknik Samplingnya*. Benefita, Jakarta.
- Arikunto, Suharsimi. 2010. *Prosedur Penelitian Suatu Pendekatan Praktik*. Penerbit Rineka Cipta, Jakarta.
- ASTM International. 2009. *Annual Book of ASTM Standards Section 5: Petroleum Products, Lubricants, and Fossil Fuels*. West Conshocken, Pennsylvania, USA.
- Badan Geologi Kementrian ESDM. 2011. *Statistik Batubara*.
<http://prokum.esdm.go.id/Publikasi/Statistik/Statistik%20Batubara.pdf> . Maret 2014.
- Barita. 2010. *Kajian Pembakaran Batubara Serentak dengan Sekam Padi Menggunakan Sistem Fluidisasi*. Universitas Sumatera Utara. Medan.
- BPLHD Provinsi Jawa Barat dan JETRO. 2011. *Manajer Pengendalian Pencemaran Udara*. Bandung.
- Brady, George S., Clauser, Henry R., Vaccari, John A. 2002. *Material Handbook Fifteenth Edition*. Mc Graw Hill. United States.
- Cahyadi. 2003. *Penelitian Metode Injeksi Batu Kapur Untuk Penurunan Emisi SO₂ Dan Aplikasinya Pada Pembangkit Listrik*. B2TE BPPT.
- Cahyadi. 2006. *Strategi Penurunan Emisi SO₂ pada PLTU Batubara yang Tidak Memiliki Desulfurisasi*. B2TE BPPT.
- Cahyono, Waluyo Eko. 2011. *Kajian Tingkat Pencemaran Sulfur Dioksida dari Industri di Beberapa Daerah di Indonesia*. LAPAN.
- Copper, C. David and Alley, F. C. 1986. *Air Pollution Control A Design Approach 2nd Edition*. Waveland Press Inc, Prospect Heights.
- Djokosetyardjo, MJ. 1990. *Pembahasan Lebih Lanjut Tentang Ketel Uap*. Jakarta; PT. Pradnya Paramita.
- El-Wakil, M.M. 1984. *Powerplant Technology International Edition*. Mc.Graw Hill, Singapore.
- Energi dan Sumberdaya Mineral (ESDM). 2006. *Blueprint Pengelolaan Energi Nasional 2006-2025 Sesuai Peraturan Presiden No. 5 Tahun 2006*. Jakarta.
- Fardiaz, Srikandi. 1992. *Polusi Air dan Udara*. Penerbit Kanisius - IPB. Bogor.
- Fatimah dan Herudiyanto. 2011. *Kandungan Sulfur dalam Batubara Indonesia*. Pusat Sumber Daya Geologi Indonesia ESDM.
- Hlincik, T. dan Buryan, P. 2013. *Desulfurization of Boiler Flue Gas by Means of Activated*

- Calcium Oxide*. Institute of Chemical Technology Prague, Czech Republic.
- Huboyo, Haryono S. dan Budihardjo, M. Arief. 2008. *Buku Ajar Pencemaran Udara Teknik Lingkungan*. Universitas Diponegoro, Semarang.
- Iswan. 2010. *Penanggulangan Limbah PLTU Batubara*. Program Studi Teknik Elektro Universitas Khairun, Ternate.
- Kadir, Abdul. 1995. *"Energi: Sumberdaya, Inovasi, Tenaga Listrik, Potensi Ekonomi"* Edisi Kedua/Revisi. UI-Press. Jakarta.
- Lestari, Hera. 2008. *Analisis Dekomposisi Termal Batubara Sub-bituminus Muaro Bungo Jambi dengan Differential Thermal Gravimetry*.
- Nukman. 2008. *Dekomposisi Volatile Matter dari Batubara Tanjung Enim dengan Menggunakan Alat Thermogravimetry Analyzer (TGA)*. Universitas Sriwijaya. Sumatera Selatan.
- Nurhidayati. 2007. *Sintesis Polibend Antara Polistiren dengan Pati Tapioka Serta Karakterisasinya*. Institut Teknologi Bandung.
- Patabang, Daud. 2009. *Kebutuhan Udara Pembakaran Untuk Membakar Berbagai Jenis Batubara*. Universitas Taduluko. Maluku.
- Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 21 Tahun 2008 tentang Baku Mutu Emisi Sumber Tidak Bergerak bagi Usaha dan / atau Kegiatan Pembangkit Listrik Tenaga Thermal.
- Peraturan Pemerintah Nomor 41 Tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran Udara.
- PT PLN (Persero) Pembangkitan Tanjung Jati B. 2009. *Teknologi Tanjung Jati B: Menaruh Perhatian pada Lingkungan*. <http://www.future-works.net/pltu/>. November 2014.
- Rosenqvist, T. 2004. *"Principles Of Extractive Metallurgy" Second Edition*. Tapir Academic Press. Trondheim.
- Russell. 2007. *Apparatus and Methods for Producing Calcium Chloride and Products Made Therefrom*. <http://www.freepatentsonline.com/20070009423.pdf>. Juni 2014.
- Sari, Nopryani Linda. 2009. *Potensi Batubara Indonesia Sebagai Sumber Energi Masa Depan*. http://blhd.tanahbumbukab.go.id/index.php?option=com_content&view=article&id=151&Itemid=210. Desember 2014.
- Shakhashiri, Bassam Z. 2012. *Chemical of the Week Lime: Calcium Oxide – CaO*. http://www.scifun.org/CHEMWEEK/PDF/LIME_CalciumOxide.pdf. September 2014.
- Soedomo, Moestikahadi. 2001. *Pencemaran Udara (Kumpulan Karya Ilmiah)*. Penerbit ITB, Bandung.
- Souza, Fabiana de. Dan Braganca, Saulo R. 2013. *Thermogravimetric Analysis of Limestones with Different Contents of MgO and Microstructural Characterization in Oxy-combustion*. Universtdade Federal do Rio Grande do Sul. Brazil.
- Sutrisno, Budi. 1994. *Analisa Perpindahan Kalor pada Pipa-pipa Konveksi Akibat Fouling Hasil Pembakaran Batubara dalam Boiler Simulator*. Universitas Brawijaya. Malang.
- Tim Kajian Batubara Nasional. 2006. *Batubara Indonesia*. Pusat Litbang Teknologi dan Mineral Batubara. Jakarta.
- United Nations Environment Programme (UNEP). 2006. *Peralatan Termal: Bahan Bakar dan Pembakaran*. Pedoman Efisiensi Energi untuk Industri di Asia – www.energyefficiencyasia.org.
- Wardhana, Wisnu Arya. 1995. *Dampak Pencemaran Lingkungan*. Penerbit Andi Offset. Yogyakarta.